

岩盤大空洞周辺の掘削影響領域内の 応力および A E の挙動に関する研究

The Behavior of EDZ around Rock Cavern by AE Measurement and DEM Simulation

青木謙治*・水戸義忠*・森孝之**・前島俊雄***・岡村武****

Kenji AOKI, Yoshitada MITO, Takayuki MORI, Toshio MAEJIMA and Takeshi OKAMURA

In highly stressed rock, the stress-induced cracks are often developed by the excavation of caverns, and EDZ (Excavation Disturbed Zone) will be formed around the caverns. The monitoring and control of EDZ is the one of the most important required technology for the design of caverns such as the high-level radioactive waste repository. In this study, the behaviors of AE (Acoustic Emission) parameters measured around the actual large rock cavern are compared with those of stress and displacement. DEM simulation of excavation of the cavern is also carried out. As the result, it is clarified that AE parameters are effective to grasp the stress state and the generation and propagation of EDZ.

Key Words: acoustic emission (AE), excavation disturbed zone (EDZ), rock cavern, field measurement, distinct element method (DEM)

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分場の建設が予定されている大深度・高地圧下の岩盤においては、空洞周辺に形成される掘削影響領域 (EDZ) と岩盤の応力変化の関連性が極めて大きいことが知られており、応力とその変化に着目した空洞の設計管理が必要となる。そこで本研究では、応力変化を鋭敏に検知することが徐々に明らかになっている岩盤微小破壊音 (AE) に着目して、応力変化に伴う EDZ の形成および進展のメカニズムを解明することを目指す。現実の岩盤大空洞掘削時に得られた計測結果の分析を行うとともに、原位置試験結果に基づく粒状体個別剛体要素法によるシミュレーションを行った。

2. AE パラメータ

AE とは、固体が塑性変形あるいは破壊する際にそれまで蓄えられていたひずみエネルギーが解放されて弾性波を生じる現象である。岩盤分野においても AE を利用した様々な技術についての研究が進められており、そのひとつとして、わが国における地下発電所等のケースヒストリー¹⁾から、高地圧下の岩盤中において AE が岩盤の応力変化や破壊現象を鋭敏に捉えるということが徐々に明らかになってきている。本研究では AE のパラメータとして AE 発生数、卓越周波数および最大振幅から算出される m 値の 3 つに着目した。

* 正会員 工学博士 京都大学大学院 工学研究科

** 正会員 工学博士 鹿島建設(株)技術研究所

*** 正会員 工学博士 東京電力(株)

**** 修士(工学) 京都大学大学院 工学研究科

2.1 AE 発生数

AE 発生数とは微小亀裂の発生に伴って離散的に発生する AE を個数として計数したものである。そのためパラメータとしての AE 発生数には明確な物理的意味があり、岩盤分野における既往の研究実績も豊富で、岩盤の破壊に際して発生数が増加するという結果が多数報告されている。本研究では、あるしきい値を超えた一群の波をひとつの AE として計測するイベント計数法を用いる。

2.2 卓越周波数

一般に弾性波には高周波であるほどその伝達経路においての減衰が大きいという特性があり、この特性により岩盤の破壊過程において AE の卓越周波数が変化すると考えられる。すなわち、岩盤に応力が集中すると、岩盤が緻密になり弾性波を遮断する空隙が減ることから、センサーまで到達することができる高周波の AE が増加する。一方で、岩盤が破壊に至ると、微小亀裂の発生によって岩盤内の空隙が増加し高周波の AE が遮断されやすくなることから、低周波の AE が卓越するものと考えられる。したがって、センサーが受振した AE 波の卓越周波数帯域を捉えることにより、岩盤の破壊の進展状況を把握することができると考えられる。本研究において卓越周波数は、FFT パワースペクトルの図心から求めるものとする。

2.3 m 値

AE の最大振幅は、放出されたひずみエネルギーや発生した微小亀裂などの AE 発生源での規模に関係していると考えられる。AE の最大振幅を扱う場合、個々の AE の最大振幅ではなく、どのような振幅の現象がどのように発生するかという振幅の分布をパラメータとして扱うことが重要である。地震の分野において石本と飯田²⁾は最大振幅と発生頻度の関係を

$$n(A)dA = KA^{-m}dA \quad (1)$$

と表している。ここで $n(A)$ は最大振幅 A から $A+dA$ までの地震の発生頻度、 K は定数である。式 (1) 中の指数は m 値と呼ばれており、本研究においては、この m 値を AE の最大振幅と発生頻度の関係を示すパラメータとして用いている。

式 (1) からわかるように、 m 値とは AE の累積度数と最大振幅値との関係を両対数グラフ上で示し、直線近似したときの勾配の絶対値である。図-1 は岩石の三軸圧縮試験時に得られた AE の最大振幅と発生頻度の関係を 3 つの段階ごとに表したものである。まず (a) の載荷後は比較的振幅の小さな AE が発生するため m 値は大きいが、

(b) の破壊直前（ピーク強度付近）になると、ひずみエネルギーが蓄積され発生する微小亀裂の規模が大きくなることによって、最大振幅の大きな AE が多数発生するため m 値は低下する。さらに (c) の破壊後では最大振幅の大きな AE の発生頻度は減少し m 値が大きくなるという反転現象を示す。

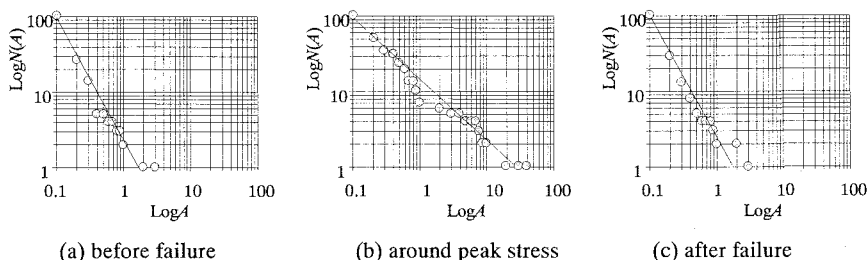


図-1 破壊過程における一般的な m 値の変化

3. 現場計測結果に基づく応力変化と AE パラメータの挙動

3.1 計測地点と現場計測の概要

本研究では東京電力㈱神流川地下発電所の本体空洞掘削時の計測結果について検討を行った。高さ 52m, 幅 33m, 長さ 216m のこの空洞は、土被り約 500m の大深度に、アーチ部および 12 層のベンチごとに逐次掘削が進められた。図-2 に示すように、空洞周辺の岩盤は中生代に堆積した泥岩や砂岩などの混在岩（90% 以上が CH 級）であり、6 つの地質に区分することができる。各地質の岩盤物性（弾性係数、破壊強度等）は、原位置岩盤試験などから得た。また、空洞周辺の初期地圧の主応力軸は垂直方向から約 26° 傾いている。

計測は、空洞掘削に先立って周辺に掘削されたボーリング孔内の多数の地点において行った。その項目としては AE、応力変化、変位、亀裂開口量などがある。今回は空洞 H 断面の 4 ベンチ位置に水平に掘削された H-10 計測線上の空洞壁面から 3m の地点において詳細な検討を行った。

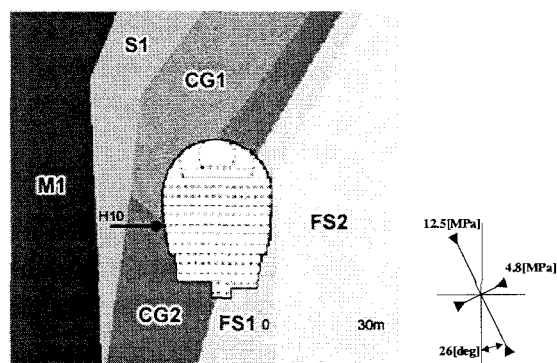


図-2 H断面空洞周辺地質図

M1 = mudstone, S1 = sandstone, CG1 = conglomerate, CG2 = coarse sandstone, FS1 = sandstone, and FS2 = sandstone.

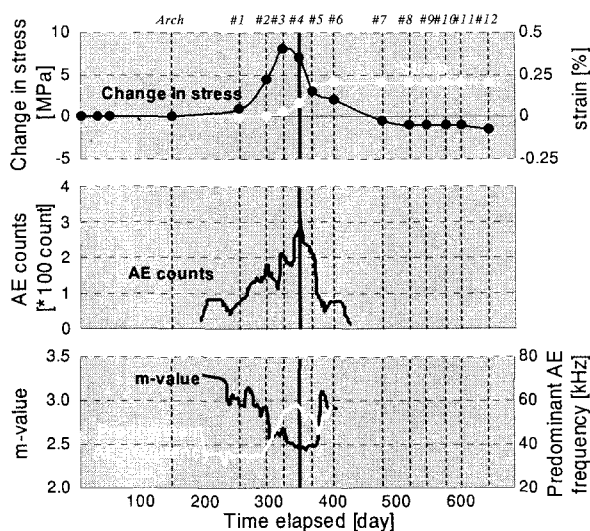


図-3 H-10 計測線上 3m 地点での計測結果

3.2 AE パラメータの挙動と応力変化・ひずみとの関係

H-10 計測線上 3m 地点における応力変化、ひずみ、AE パラメータの計測結果を図-3 に示す。これらの関係を、予め行った岩石の三軸圧縮試験における AE パラメータの挙動をふまえて検討した。

まず、アーチ部掘削時には AE の発生は見られず、1 ベンチ掘削段階になって発生し始める。この際応力はやや集中し始めるものの、ひずみはほとんど見られない。2 ベンチ、3 ベンチ掘削時にかけでは AE 発生数の増加、高周波 AE の卓越、m 値の低下といった応力集中を示す AE パラメータの変化が確認できるが、実際極めて高い応力が集中しているのがわかる。4 ベンチ、5 ベンチ掘削時に AE 発生数はピークを迎え、卓越周波数は高いレベルを、m 値は低いレベルを維持している。これは岩盤にかかる応力がピーク強度に達し、破壊の直前であることを示している。またこのことはひずみが急激に増大していることからわかる。6 ベンチ、7 ベンチ掘削段階になると、AE 発生の収束、低周波 AE の卓越、m 値が急激な増加（反転現象）などから岩盤が破壊に至ったものと考えられる。その後の掘削において応力やひずみが一定のレベルを維持していることからこの地点の岩盤の破壊が終結したことがわかる。以上のことから、AE の各パラメータの挙動が岩盤の応力変化を精度良く捉えていることが確かめられた。

4. 粒状体個別剛体要素法を用いた空洞掘削解析

4.1 解析の概要

粒状体による個別剛体要素法 (DEM)³⁾ を用いた空洞の逐次掘削シミュレーションを行い、ベンチ掘削の各段階での応力状態や亀裂の発生状況を把握した。また解析結果を計測結果と比較することでその妥当性を確かめ、AE パラメータとの関連性もふまえて EDZ の形成および進展の過程について考察を行った。

以下にシミュレーションの手順を示す。

- (1) 粒状体個別剛体要素法において岩盤物性はボンドで結合された個々の粒子の力学特性によって決まるため、まず個々の粒子の力学特性を設定する必要がある。二軸圧縮試験を模擬したシミュレーションを行い、得られた物性と実際の岩盤物性とを比較し、それらが一致するように粒子の力学特性を更新する、という一連の作業を何度も繰り返すことにより、適切な粒子の力学特性を決定する⁴⁾。
- (2) 応力再配分や亀裂発生の大局的な傾向を把握するため、図-4の左に示すグローバルモデルによるシミュレーションを行う。(1)で決定した粒子の力学特性をもとに空洞周辺の岩盤モデルを作成し、これに初期応力を作用させる。この条件の下で、アーチ部および各ベンチに相当する部分を逐次掘削していく。
- (3) 図-4の右に示す空洞側壁部のセクターモデルによるシミュレーションを行う。このモデルの初期状態はグローバルモデルのアーチ部掘削完了時の応力状態をもとに設定している。セクターモデルでは粒子の直径を非常に小さく(12~20cm)設定することで、局所的な応力変化や亀裂の進展の過程を詳細に検討することが可能となる。実際の計測点に相当する地点には一定の大きさの計測円を設け、その円内での平均値を解析値としている。

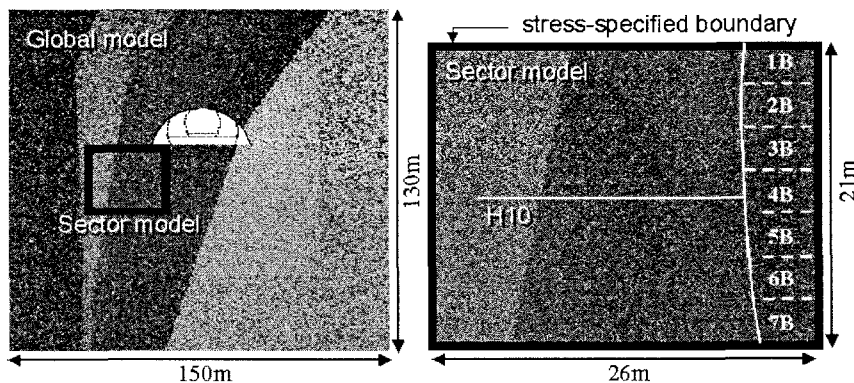


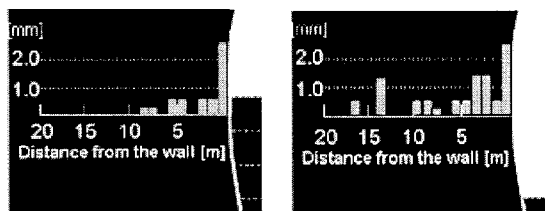
図-4 グローバルモデルとセクターモデル

4.2 解析結果および計測結果との比較

はじめに、セクターモデルによる解析結果について、図-5に(a)差応力および(b)微小亀裂の分布を掘削段階ごとに示す。まず1ベンチ、2ベンチ掘削時には掘削ベンチの壁面付近に応力の集中が見られ、応力集中領域において微小亀裂が発生し始める。この段階では引張力による亀裂が卓越している。3ベンチ掘削時には応力集中および微小亀裂発生の範囲が拡大する。4ベンチ掘削段階になると応力集中領域が壁面から離れた位置へと移行し始め、それに伴って微小亀裂がより岩盤深部でも発生するようになる。この際発生する微小亀裂は地質の境界周辺に集中しており、岩盤の不連続面を中心に破壊面が形成されつつあることがわかる。つづく5ベンチ掘削時には応力集中領域はさらに岩盤深部へと移行し、壁面近傍において応力が低下した領域(ゆるみ領域)が形成されている。また、破壊面に沿って比較的規模の大きな微小亀裂が集中的に発生し、亀裂が進展していく様子が捉えられている。

6 ベンチ掘削完了段階で破壊面における亀裂の進展はほぼ終結し、さらに深部の地質境界に沿ってせん断力による微小亀裂が新たに発生し始めるが、その規模は小さなものである。解析により以上のような応力の再配分過程および微小亀裂の発生・進展過程を把握することができた。

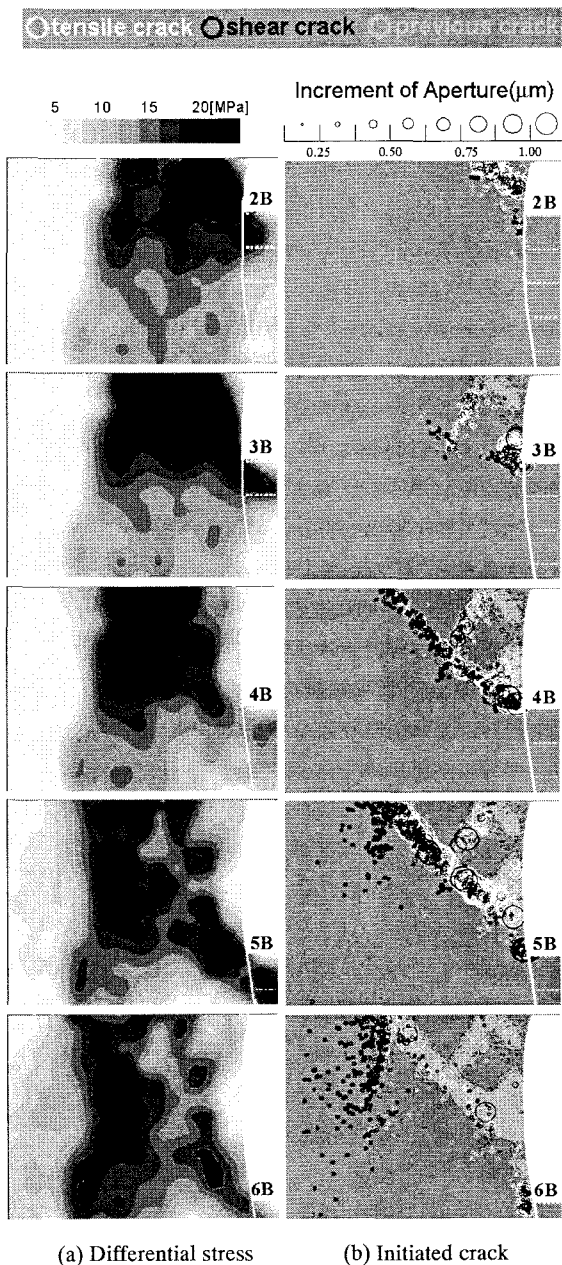
次に、解析結果の妥当性を確認する。まず亀裂の状況については、H-10 計測線においてボアホールテレビにより観測された亀裂開口量の分布（図-6）と比較する。観測結果では、3 ベンチ掘削時の亀裂発生は壁面近傍のみであり、6 ベンチ掘削段階になると亀裂発生が岩盤深部に及ぶとともに、壁面近傍の亀裂がさらに開口しているが、解析結果（図-5）がこれと良く一致した挙動を示していることがわかる。また応力に関しては、H-10 計測線上 3m 地点における変化量を比較する（図-7）。図中には有限要素法（FEM）を用いたひずみ軟化解析の結果もあわせて表示してある。実測結果を見ると、3 ベンチ掘削時に応力集中がピークを迎えた後、掘削の進行に伴って徐々に低下している。解析結果のうち FEM の場合は、応力変化の傾向は捉えているものの、ピーク時のレベルやその時期および低下時の様子などが実測結果とやや異なっている。一方、本研究で用いた DEM の場合は、そのような細かな部分まで実測結果と極めて良く一致していることがわかる。これは、FEM の場合に比べ個々の要素（粒子）を非常に細かく設定したことで、粒子間に発生する微小亀裂の影響が逐次反映されたためであると考えられる。以上の比較により、解析結果が十分妥当なものであったといえる。



(a) Bench No.3

(b) Bench No.6

図-6 H-10 計測線における亀裂開口量分布



(a) Differential stress

(b) Initiated crack

図-5 セクターモデルによる解析結果

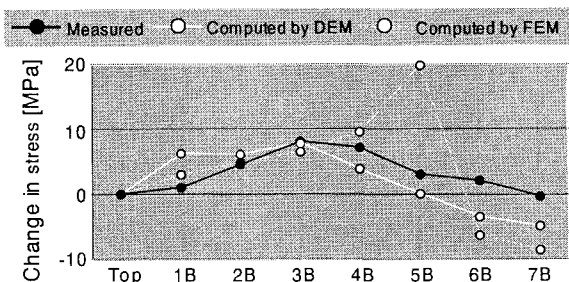
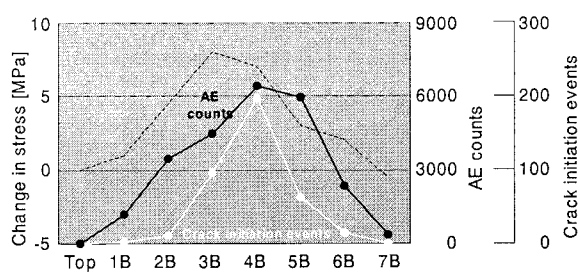
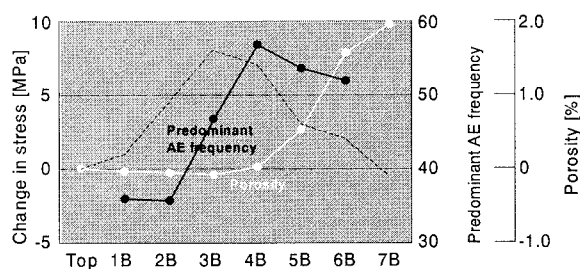


図-7 H-10 計測線上 3m 地点での応力変化の比較

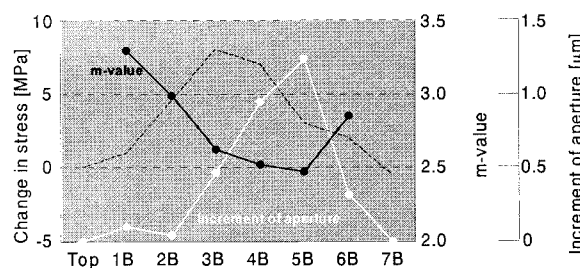
最後に、第2章で述べた各 AE パラメータの物理的意味に基づいて、計測により得られた AE パラメータの挙動と解析により得られた破壊現象に関するパラメータの挙動とを比較し(図-8)、応力変化をふまえて考察を行った。まず(a)の AE 発生数と微小亀裂の発生数については、微小亀裂の発生に伴って AE が発生するという直接的な関わりがあるため、両者とも応力集中に伴って増加し、破壊後の応力低下に伴って収束するという傾向がみられた。次に(b)の卓越周波数と空隙率については、応力が集中する段階で空隙率がやや減少する(岩盤が緻密になる)ため、高周波 AE が卓越するようになるが、岩盤が破壊に至ると空隙率が増加するため、高周波 AE が遮断され、結果的に卓越周波数は低下するという関係が示された。また(c)の m 値と微小亀裂の発生時開口量については、岩盤が破壊に至る過程において、発生する微小亀裂の規模が大きくなるため、振幅の大きな AE が発生する割合が多くなり、 m 値は低下するが、破壊が終結すると微小亀裂の規模は小さくなるため、振幅の大きな AE はほとんど発生せず、 m 値が急激に増加するという関係が示された。以上の結果から、各 AE パラメータの挙動が示す物理的意味をより明確にすることができたといえる。



(a) AE counts and crack initiation events



(b) Predominant AE frequency and porosity



(c) m -value and total increment of crack aperture

5. まとめ

本研究では、岩盤大空洞掘削時の計測結果を分析することにより、AE 発生数・卓越周波数・ m 値の3つの AE パラメータが岩盤の応力変化を鋭敏に捉えていることを確認した。また原位置岩盤試験結果などに基き粒状体個別剛体要素法による空洞掘削解析を行った結果、実測結果と良く対応しており、応力再配分および亀裂の発生・進展の過程を把握することができた。さらに AE パラメータの持つ物理的意味を明確にすることができた。これらの結果から、AE 計測と DEM 解析を行うことで、応力再配分や EDZ の形成および進展の過程を精度よく把握できることが判明した。

参考文献

- 1) 例えば Mori, T., Aoki, K., Morioka, H., Iwano, K., Tanaka, M. & Kanagawa, T., 2003. Application of borehole seismic and AE monitoring technique in the rock cavern, *10th ISRM Congress*, pp. 845-848
- 2) Ishimoto, M. & Iida, K. 1939. Observations of earthquakes registered with the microseismograph constructed recently, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, Tokyo Univ., 17: 443.
- 3) Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. 1979. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Géotechnique* 29: 47-65
- 4) Itasca Consulting Group, Inc. 2002. *PFC2D – Particle Flow Code in 2 Dimensions, Ver. 3.0*. Minneapolis: Itasca.